

# Thiết kế cấu trúc nano bạc tuần hoàn 2D tạo hiệu ứng cộng hưởng plasmon bề mặt vùng hồng ngoại gần ứng dụng cho cảm biến

Nguyễn Xuân Bách<sup>1</sup>, Nguyễn Hữu Tu<sup>2,3</sup>, Phạm Thanh Sơn<sup>2</sup>, Ngô Quang Minh<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup>Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

<sup>3</sup>Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 13/10/2023; ngày chuyển phân biện 15/10/2023; ngày nhận phân biện 31/10/2023; ngày chấp nhận đăng 6/11/2023

## Tóm tắt:

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu lý thuyết và mô phỏng cấu trúc nano bạc (Ag) tuần hoàn 2D tạo hiệu ứng cộng hưởng plasmon bề mặt vùng hồng ngoại gần. Để làm rõ cơ chế cộng hưởng plasmon bề mặt của cấu trúc, lý thuyết cộng hưởng plasmon bề mặt định xứ và không định xứ đã được trình bày. Phương pháp đạo hàm hữu hạn trong miền thời gian (FDTD) được sử dụng để mô phỏng các tính chất quang của cấu trúc nano Ag sắp xếp tuần hoàn 2D và kiểm chứng kết quả tính toán lý thuyết thu được. Các tính toán, mô phỏng về sự phụ thuộc của cộng hưởng plasmon bề mặt vào chiết suất của môi trường xung quanh cho thấy cấu trúc được đề xuất nhạy với môi trường chất khí, với độ nhạy trung bình 1423,7 nm/RIU (đơn vị chiết suất) và hệ số phẩm chất (FOM) trung bình đặc trưng cho độ chọn lọc là 110,2 RIU<sup>-1</sup>. Các kết quả tính toán và mô phỏng làm nền tảng cho việc chế tạo các cảm biến chiết suất plasmonic vùng hồng ngoại gần nhạy với sự thay đổi nhỏ của môi trường xung quanh.

**Từ khóa:** cảm biến plasmonic, cộng hưởng plasmon bề mặt, đạo hàm hữu hạn trong miền thời gian.

**Chỉ số phân loại:** 1.3, 2.9

## Near-infrared plasmonic sensors based on surface plasmon resonances in two-dimensional metasurfaces of silver nanostructures

Xuan Bach Nguyen<sup>1</sup>, Huu Tu Nguyen<sup>2,3</sup>, Thanh Son Pham<sup>2</sup>, Quang Minh Ngo<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>University of Science and Technology of Hanoi, Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

<sup>3</sup>Graduate University of Science and Technology, Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

Received 13 October 2023; revised 31 October 2023; accepted 6 November 2023

## Abstract:

This paper presents the results of theoretical research and numerical simulation of two-dimensional (2D) metasurfaces of silver (Ag) nanostructures that enable the surface plasmon resonances in the near-infrared regions. To clarify the mechanism of surface plasmon resonance that appears in the designed structures under electromagnetism stimuli, the theory of localised surface plasmon resonance and propagating surface plasmon resonance was presented. The finite-difference time-domain (FDTD) method was used to simulate the optical properties of 2D periodically arranged Ag nanostructures and to verify the theoretical prediction results. Calculated and simulated results for the dependence of the surface plasmon resonance and the refractive index of the surrounding medium are performed and show that the proposed structure is sensitive to the gas environment, with an average sensitivity of 1423.7 nm/RIU (refractive index unit) and the average quality factor (FOM) characterising the selectivity is 110.2 RIU<sup>-1</sup>. The calculation and simulation results provide a general guideline for plasmonic metasurface sensing device designs that are sensitive to small changes in the surrounding environment.

**Keywords:** finite-difference time-domain, plasmonic sensors, surface plasmon resonance.

**Classification numbers:** 1.3, 2.9

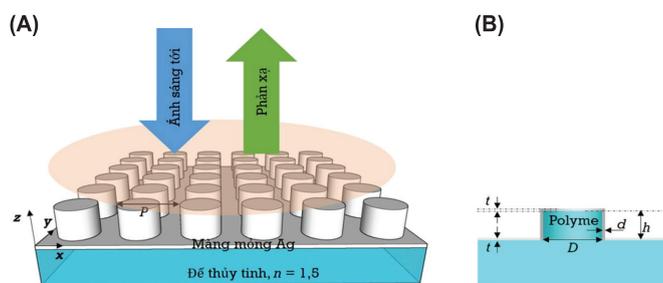
\*Tác giả liên hệ: Email: ngo-quang.minh@usth.edu.vn

## 1. Mở đầu

Hiệu ứng plasmon bề mặt (Surface Plasmon - SP) xảy ra do sự tương tác của sóng điện từ và điện tử tự do tại bề mặt kim loại có kích thước nhỏ hơn bước sóng, đặc biệt với các kim loại quý như vàng (Au), bạc (Ag), bạch kim (Pt)... Dưới tác động đủ lớn của năng lượng điện từ, các điện tử tự do tại bề mặt kim loại sẽ được kích thích. Tại tần số (bước sóng) phù hợp, cộng hưởng sẽ xảy ra, biên độ dao động tập thể của các điện tử đạt giá trị cực đại. Cộng hưởng plasmon bề mặt gây ra sự tăng cường điện từ trường tại bề mặt phân cách kim loại-điện môi, dẫn tới các tương tác quang mạnh tại bề mặt: tán xạ, hấp thụ... [1].

Theo S.A. Maier (2007) [2], một trong những đối tượng nghiên cứu plasmonic hiện nay là các ứng dụng tiềm năng dựa trên các tính chất đặc biệt của cộng hưởng plasmon bề mặt. Các cấu trúc nano kim loại tạo hiệu ứng cộng hưởng plasmon bề mặt hấp thụ hoàn toàn ánh sáng tới thu hút ngày càng nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học [3]. Các cấu trúc này hấp thụ hầu hết ánh sáng tới, ngăn cản bất kỳ sự phản xạ hay truyền qua nào tại vị trí cộng hưởng. Bên cạnh đó, những tính chất quang học này nhạy với sự thay đổi của môi trường xung quanh cấu trúc, mang lại tiềm năng cho những ứng dụng về cảm biến, ví dụ như: cảm biến sinh học [4], chẩn đoán hình ảnh [5], phát hiện thuốc trừ sâu [6]. Ngoài ra, các nhà khoa học còn phát hiện cấu trúc plasmonic cũng có thể ứng dụng cho tăng cường huỳnh quang và quang phổ Raman [7]. Không dừng lại tại đó, các vật liệu plasmonic cho các ứng dụng liên quan đến năng lượng cũng thu hút được nhiều sự quan tâm nghiên cứu [8].

Do đó, hướng nghiên cứu về các cấu trúc nano kim loại tuần hoàn tạo ra các tính chất quang đặc biệt thông qua hiệu ứng cộng hưởng plasmon bề mặt ngày càng nhận được nhiều sự chú ý. Đó cũng là lý do nhóm tác giả lựa chọn nghiên cứu về cấu trúc nano Ag tuần hoàn tạo hiệu ứng cộng hưởng plasmon bề mặt vùng hồng ngoại gần định hướng ứng dụng cho cảm biến chiết suất bằng tính toán lý thuyết



**Hình 1. Minh họa cấu trúc nano Ag sắp xếp tuần hoàn 2D. (A)** Minh họa cấu trúc 3D; **(B)** Mặt cắt của một ô đơn vị. Cấu trúc được xác định bởi các thông số bao gồm hằng số mạng  $P$ , đường kính cột polyme  $D$ , chiều cao cột polyme  $h$ , độ dày lớp Ag  $t$  trên đế thủy tinh và trên đỉnh cột polyme và độ dày lớp Ag bao quanh cột polyme  $d$ .

và mô phỏng số. Cụ thể hơn, cấu trúc được lựa chọn nghiên cứu là mảng hai chiều (2D) của các phần tử dạng cột polyme trên đế thủy tinh được phủ bởi một lớp màng mỏng Ag (hình 1). Cấu trúc này được đặc trưng bởi hằng số mạng (chu kỳ tuần hoàn)  $P$ , đường kính  $D$  và chiều cao  $h$  của cột polyme, độ dày  $t$  của lớp Ag trên đế thủy tinh và trên đỉnh của cột polyme và độ dày  $d$  của lớp Ag bao xung quanh cột polyme.

## 2. Phương pháp nghiên cứu

Như đã đề cập, khi nguồn sáng kích thích (ánh sáng tới) tương tác với cấu trúc kim loại - điện môi, hiệu ứng plasmon bề mặt (có thể) xuất hiện. Dựa trên bản chất của hiện tượng, hiệu ứng plasmon bề mặt được phân loại thành hiệu ứng plasmon bề mặt định xứ (Localised Surface Plasmon - LSP) và hiệu ứng plasmon bề mặt không định xứ (Delocalised Surface Plasmon - DSP hay Propagating Surface Plasmon - PSP).

Hiệu ứng plasmon bề mặt không định xứ gắn liền với các bề mặt kim loại tiếp xúc với môi trường điện môi. Tại mặt tiếp xúc kim loại - điện môi, hiệu ứng plasmon bề mặt biểu hiện bởi các sóng điện từ liên kết chặt chẽ với bề mặt kim loại. Điều này làm tăng cường điện trường gần bề mặt theo hướng vuông góc với bề mặt tiếp xúc kim loại - điện môi, điện trường này suy giảm theo hàm mũ của khoảng cách từ bề mặt kim loại. Mặc dù plasmon bề mặt có thể lan truyền khi chúng được tạo thành tại tiếp xúc kim loại - điện môi phẳng, thực tế là chúng khó có thể bị kích thích bởi ánh sáng lan truyền tự do, vì động lượng của plasmon bề mặt lớn hơn của ánh sáng kích thích ở cùng tần số (bước sóng) [9]. Để tạo ra plasmon bề mặt, nhiều phương pháp đã được đề xuất để làm cân bằng động lượng, bao gồm: (i) Sử dụng kết hợp lăng kính nhằm tăng động lượng của ánh sáng tới; (ii) Tán xạ từ khuyết tật hình học (dạng lỗ) của màng mỏng kim loại có thể tạo các plasmon bề mặt cục bộ và (iii) Cấu trúc cách tử (grating) trên bề mặt kim loại [10].

Trái ngược với bản chất lan truyền sóng trên tiếp xúc kim loại - điện môi của hiệu ứng plasmon bề mặt không định xứ, hiệu ứng plasmon bề mặt định xứ là kết quả của quá trình dao động tập thể của các điện tử tự do dưới kích thích của sóng điện từ và bị giới hạn ở bề mặt của phần tử kim loại. Khác với kim loại khối, hiệu ứng plasmon bề mặt ở các phần tử kim loại kích thước nano có thể được kích thích trực tiếp bởi sóng điện từ lan truyền trong vùng nhìn thấy. Các điện tử tự do dao động điều hòa do trường điện từ dao động khi nguồn sáng kích thích tương tác với phần tử kim loại. Cộng hưởng xảy ra khi tần số (bước sóng) của ánh sáng tới phù hợp với dao động tập thể của các điện tử tự do tại bề mặt phần tử kim loại, dẫn tới xuất hiện các tính chất quang đặc biệt [11].

Theo đó, cấu trúc Ag tuần hoàn 2D được giới thiệu ở phần 1 có thể mang lại cả hiệu ứng plasmon bề mặt định xứ và không định xứ. Đối với hiệu ứng plasmon bề mặt không định xứ hình thành trên bề mặt cấu trúc Ag tuần hoàn 2D, điều kiện cộng hưởng được mô tả bởi lý thuyết nhiễu xạ cách tử như sau [2]:

$$\vec{k}_{PSP} = \vec{k}_{xy} + m\vec{G}_x + l\vec{G}_y \quad (1)$$

trong đó,  $\vec{k}_{PSP}$  là vec-tơ sóng của PSP và được biểu diễn bởi:

$$\vec{k}_{PSP} = \vec{k}_0 \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_{Ag}}{\epsilon_d + \epsilon_{Ag}}} \quad (2)$$

với  $\vec{k}_{xy}$  là hình chiếu trên mặt phẳng xoy của vec-tơ sóng tới  $\vec{k}_0$  với góc tới  $\theta$ :

$$\vec{k}_{xy} = \vec{k}_0 \sin \theta \quad (3)$$

$\vec{G}_x$  và  $\vec{G}_y$  là các vec-tơ mạng đảo theo trục  $x$  và  $y$ , được định nghĩa bởi:

$$\vec{G}_x = \frac{2\pi}{P_x} \vec{i}_x \quad (4)$$

$$\vec{G}_y = \frac{2\pi}{P_y} \vec{i}_y$$

Trong trường hợp  $P_x = P_y = P$ , bước sóng cộng hưởng có thể được xấp xỉ như sau:

$$\lambda_{m,l} = \frac{P}{\sqrt{m^2 + l^2}} \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_{Ag}}{\epsilon_d + \epsilon_{Ag}}} \quad (5)$$

trong đó,  $m, l$  lần lượt là bậc nhiễu xạ theo hướng  $x$  và  $y$ ;  $\epsilon_d$  và  $\epsilon_{Ag}$  mô tả hàm điện môi của môi trường xung quanh và kim loại Ag. Hiệu ứng plasmon bề mặt không định xứ phụ thuộc vào hàm điện môi của môi trường và kim loại, bậc nhiễu xạ và hằng số mạng của cấu trúc tuần hoàn.

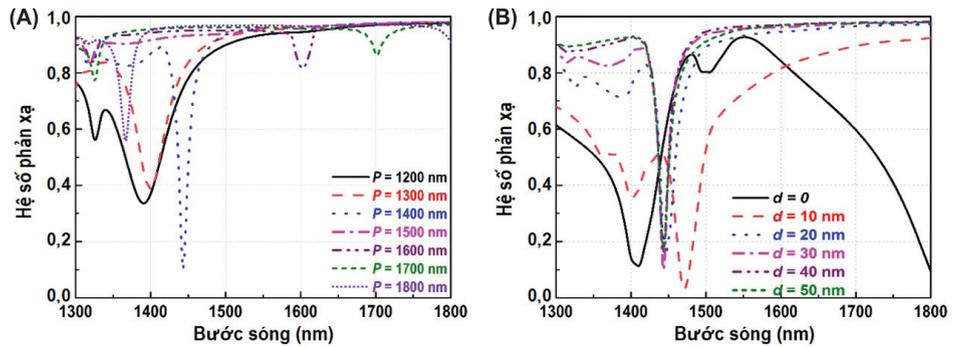
Cộng hưởng plasmon bề mặt định xứ đối với cấu trúc nano Ag trong nghiên cứu này có thể được kích thích bởi ánh sáng có tần số (bước sóng) thích hợp. Tuy nhiên, việc dự đoán chính xác tần số (bước sóng) cộng hưởng là không thực tế. Các nghiên cứu về hiệu ứng plasmon bề mặt định xứ chỉ ra rằng, hiệu ứng này phụ thuộc mạnh vào mật độ điện

tử tự do tại bề mặt kim loại, hình dạng và kích thước của phân bố điện tích [11]. Theo cách đó, tần số (bước sóng) cộng hưởng và tính chất quang của cấu trúc tại cộng hưởng plasmon bề mặt sẽ thay đổi theo kích thước của phần tử kim loại, hình dạng của phần tử kim loại và môi trường điện môi xung quanh [12].

Bên cạnh các tính toán lý thuyết, để xem xét các đặc tính quang học của cấu trúc nano Ag đã được giới thiệu trong phần 1 dưới kích thích của sóng điện từ, các tính toán mô phỏng số cũng được thực hiện thông qua việc sử dụng phương pháp đạo hàm hữu hạn trong miền thời gian (Finite-Difference Time-Domain - FDTD) được tích hợp trong phần mềm thương mại Lumerical [13]. Đối với cấu trúc tuần hoàn 2D, đặc tính của cấu trúc có thể thu được từ một ô đơn vị với điều kiện biên phù hợp. Ô tính toán đơn vị cần được định nghĩa trước khi miền FDTD được xác định; kích thước của chúng phụ thuộc vào cấu hình nghiên cứu. Không gian tính toán được rời rạc hóa bằng phương pháp chia lưới đồng nhất với phần tử lưới có kích thước 1 nm. Đỉnh và đáy của miền FDTD được sử dụng lớp hấp thụ hoàn hảo (Perfect Matched Layers), cùng với các mặt xung quanh tuần hoàn (Periodic Condition). Nguồn sáng phẳng với phân cực điện trường theo phương  $x$  được sử dụng làm sóng tới. Phía trên và dưới cấu trúc, hai bộ thu được sử dụng để thu nhận ánh sáng (sóng điện từ) phản xạ và truyền qua cấu trúc.

### 3. Kết quả và bàn luận

Hình 2 mô tả phổ phản xạ của cấu trúc được đề xuất tại hình 1 dưới góc tới vuông góc mặt phẳng cấu trúc. Các tham số cấu trúc bao gồm đường kính cột polyme  $D=1000$  nm, chiều cao cột polyme  $h=800$  nm, độ dày lớp Ag  $t=100$  nm và (i) độ dày lớp Ag bao xung quanh cột polyme  $d=30$  nm và chu kỳ tuần hoàn  $P$  của cấu trúc có các giá trị 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700 và 1800 nm hoặc (ii) chu kỳ tuần hoàn  $P=1400$  nm và độ dày lớp Ag bao xung quanh cột



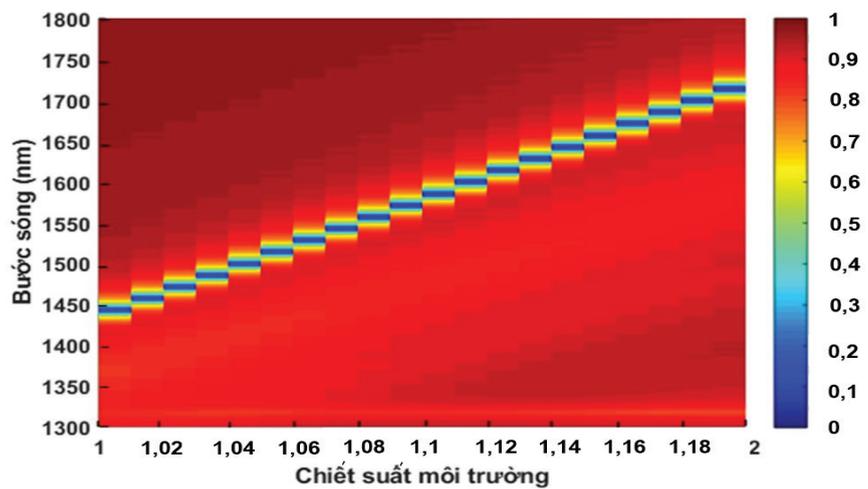
Hình 2. Phổ phản xạ của cấu trúc nano Ag tuần hoàn 2D được minh họa tại hình 1 dưới tác động của nguồn sáng tới vuông góc với mặt phẳng cấu trúc. (A)  $D=1000$  nm,  $d=30$  nm,  $h=800$  nm,  $t=100$  nm và  $P$  thay đổi trong khoảng 1200-1800 nm; (B)  $D=1000$  nm,  $P=1400$  nm,  $h=800$  nm,  $t=100$  nm và  $d$  thay đổi trong khoảng 0-50 nm.

polyme  $d=0, 10, 20, 30, 40$  và  $50$  nm. Cấu trúc tuần hoàn 2D của các cột polyme để làm nền cho cấu trúc được nghiên cứu. Có thể nhận thấy tại hình 2A, tại mỗi chu kỳ  $P$ , phổ phản xạ của cấu trúc đều xuất hiện hai đáy tại đó độ phản xạ thấp hơn mức nền trung bình. Đặc tính này xuất phát từ cộng hưởng plasmon bề mặt định xứ và không định xứ. Quan sát chi tiết cho thấy trên phổ phản xạ của cấu trúc tương ứng với tất cả các chu kỳ  $P$  được xem xét đều xuất hiện một vị trí cộng hưởng lân cận tại bước sóng  $1325$  nm và hầu như không thay đổi khi chu kỳ tuần hoàn  $P$  thay đổi. Kết quả này phù hợp với tính chất đã được trình bày phía trên của cộng hưởng plasmon bề mặt định xứ. Ngược lại, đáy cộng hưởng còn lại dịch chuyển sang vùng bước sóng lớn hơn khi chu kỳ tuần hoàn  $P$  của cấu trúc tăng lên. Phân tích chi tiết hơn cho thấy, các bước sóng cộng hưởng có xu hướng thay đổi tuyến tính với chu kỳ tuần hoàn, vị trí bước sóng cộng hưởng phù hợp với công thức. Điều này đưa tới kết luận rằng, bước sóng cộng hưởng này có nguồn gốc là các plasmon bề mặt không định xứ. Đối với các giá trị khác nhau của hằng số mạng,  $P=1400$  nm mang lại phổ phản xạ với một đáy phản xạ rõ ràng, độ tương phản cao nhất tại bước sóng  $\sim 1443$  nm.

Quan sát hình 2B nhận thấy, khi độ dày của lớp Ag bao quanh cột polyme thay đổi, phổ phản xạ của cấu trúc thay đổi. Lớp Ag xuất hiện, ngăn cản ánh sáng truyền qua, đồng thời làm thay đổi tính chất của hiệu ứng plasmon bề mặt do làm thay đổi phân bố của điện tử tự do. Điều này được thể hiện đặc biệt rõ ràng khi thông số này thay đổi từ  $0$  lên  $10$  nm, khi đó đáy cộng hưởng thứ 2 trong phổ phản xạ tại  $d=0$  nm tại bước sóng  $\sim 1500$  nm trở nên tương phản hơn và có xu hướng dịch về bước sóng ngắn hơn khi  $d=10$  nm. Khi tiếp tục tăng độ dày lớp Ag  $d$  bao quanh cột polyme, có thể nhận thấy bước sóng cộng hưởng tiếp tục dịch về bước sóng ngắn, đạt giá trị ổn định với  $d=30$  nm (khi độ dày lớp Ag tăng lên, phổ phản xạ của cấu trúc gần như không đổi). Bên cạnh đó, có thể nhận thấy, trong các độ dày lớp Ag được xem xét,  $d=30$  nm cho phổ phản xạ với đáy cộng hưởng ổn định, tương phản cao, tách biệt khỏi nền phản xạ.

Vì vậy, cấu trúc với các thông số  $P=1400$  nm,  $t=100$  nm,  $D=1000$  nm,  $h=800$  nm và  $d=30$  nm được lựa chọn để thực hiện các nghiên cứu tiếp theo khi các chiết suất của môi trường xung quanh thay đổi.

Hình 3 mô tả phổ phản xạ của cấu trúc được đề xuất khi chiết suất môi trường xung quanh thay đổi từ  $1,0$  đến  $1,20$ , tương ứng với môi trường khí - hơi. Trong phạm vi phổ được xem xét, một vị trí đáy phản xạ tương ứng với màu xanh



Hình 3. Bản đồ màu thể hiện sự thay đổi bước sóng cộng hưởng và hệ số phản xạ của cấu trúc nano Ag tuần hoàn 2D với các thông số  $P=1400$  nm,  $t=100$  nm,  $h=800$  nm,  $D=1000$  nm và  $d=30$  nm khi chiết suất môi trường xung quanh thay đổi trong khoảng  $1,0$  đến  $1,2$ . Màu xanh đậm và màu đỏ đậm mô tả tương ứng hệ số phản xạ đạt giá trị cực tiểu ( $\sim 0$ ) và giá trị cực đại (100%) trong chiết suất nghiên cứu.

đậm được quan sát khá rõ ràng. Có thể nhận thấy, vùng màu xanh đậm dịch chuyển lên trên khi chiết suất môi trường xung quanh tăng lên, điều này biểu thị sự dịch chuyển cộng hưởng sang bước sóng dài hơn. Ngoài ra, mỗi sự thay đổi nhỏ trong chiết suất của môi trường xung quanh dẫn đến sự dịch chuyển đáng kể của bước sóng cộng hưởng, điều này phù hợp cho ứng dụng cảm biến chiết suất có độ nhạy cao. Thêm vào đó, có thể nhận thấy cộng hưởng quan sát được có độ tương phản cao, như vậy đảm bảo hiệu suất của các linh kiện cảm biến khi hoạt động trong môi trường có nhiễu.

Bảng 1 liệt kê các thông số quang học của linh kiện cảm biến khi chiết suất thay đổi từ  $1,0$  (không khí) đến  $1,20$  (hơi nước), bước sóng cộng hưởng tương ứng cùng độ nhạy và hệ số phẩm chất. Độ nhạy, được định nghĩa bằng  $S = \Delta\lambda/\Delta n$ , thay đổi trong khoảng  $1350-1500$  nm/RIU cho khoảng chiết suất được xem xét với  $\Delta n$  và  $\Delta\lambda$  là độ thay đổi chiết suất và độ dịch chuyển bước sóng tương ứng. Giá trị trung bình của độ nhạy tính toán được là  $\sim 1423,7$  nm/RIU. Ngoài ra, một yếu tố quan trọng khác khi xem xét đến hoạt động của cảm biến đó là độ chọn lọc, được đánh giá bằng hệ số phẩm chất FOM. Thông số này được xác định tại vị trí cộng hưởng bởi tỷ số giữa độ nhạy và bán độ rộng của phổ cộng hưởng (FWHM)  $FOM = S/FWHM$  [14] và thay đổi trong khoảng từ 99 đến  $124$  RIU<sup>-1</sup> đối với vùng chiết suất được nghiên cứu. Giá trị trung bình của thông số này khoảng  $110,2$  RIU<sup>-1</sup> cho vùng chiết suất từ  $1,0$  đến  $1,20$ . So sánh với kết quả công bố của T.K. Nguyen và cs (2017) [15] khi môi trường chiết suất tương đồng, cấu trúc cảm biến được đề xuất có độ nhạy cao hơn  $\sim 1,3$  lần ( $1423,7$  so với  $1109$  nm/RIU) và độ chọn lọc cao hơn  $\sim 2,8$  lần ( $110,2$  so với  $38,8$  RIU<sup>-1</sup>).

**Bảng 1. Tính chất quang của linh kiện cảm biến khi chiết suất môi trường thay đổi 1,0-1,2.**

Chiết suất (RIU)	Bước sóng cộng hưởng (nm)	Độ nhạy (nm/RIU)	Hệ số phẩm chất (RIU <sup>-1</sup> )
1,0	1442,9	-	-
1,01	1457,5	1460,0	123,73
1,02	1471,4	1390,0	106,60
1,03	1485,6	1417,0	126,07
1,04	1500,0	1444,0	115,52
1,05	1514,7	1473,0	115,53
1,06	1528,7	1393,0	107,32
1,07	1542,9	1420,0	117,07
1,08	1557,3	1446,0	107,35
1,09	1570,9	1359,0	108,11
1,10	1585,9	1499,0	107,30
1,11	1600,0	1410,0	108,13
1,12	1614,4	1435,0	108,06
1,13	1629,0	1461,0	118,97
1,14	1642,6	1363,0	99,13
1,15	1656,4	1385,0	99,00
1,16	1671,8	1539,0	118,93
1,17	1686,2	1435,0	99,17
1,18	1700,8	1461,0	121,35
1,19	1714,3	1350,0	99,19
1,20	1728,0	1371,0	110,12
Trung bình		1423,7	110,2

**4. Kết luận**

Bài báo trình bày cấu trúc nano Ag sắp xếp tuần hoàn 2D tạo hiệu ứng cộng hưởng plasmon bề mặt vùng hồng ngoại gần bằng nghiên cứu lý thuyết và mô phỏng. Lý thuyết về hiệu ứng plasmon bề mặt, phương pháp số để giải bài toán điện từ của cấu trúc nano Ag đã được trình bày. Kết quả mô phỏng số với sự thay đổi của hằng số mạng và độ dày lớp Ag bao quanh cột polyme đã được trình bày, phân tích và kiểm chứng lý thuyết. Tiếp đó, sự thay đổi của hiện tượng cộng hưởng đối với chiết suất môi trường khí-hơi được nghiên cứu. Kết quả cho thấy, cấu trúc đề xuất có độ nhạy cao hơn ~1,3 lần và độ chọn lọc cao hơn ~2,8 lần so với một số cấu trúc tương tự được nghiên cứu trước đó. Cấu trúc mà bài báo đề xuất có triển vọng phát triển thành linh kiện plasmonic ứng dụng cho y sinh học hoạt động trong vùng hồng ngoại gần. Đây là hướng nghiên cứu mới mà nhóm tác giả là một trong số ít nhóm đang nghiên cứu tại Việt Nam.

**LỜI CẢM ƠN**

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam trong đề tài mã số USTH.AE.01/23-24. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1] M.I. Stockman (2011), “Nanoplasmonics: Past, present, and glimpse into future”, *Opt. Express*, **19(22)**, pp.22029-22106, DOI: 10.1364/OE.19.022029.

[2] S.A. Maier (2007), *Plasmonics: Fundamentals and Applications*, Springer, 234pp.

[3] Y. Cheng, Z. Li, Z. Cheng (2021), “Terahertz perfect absorber based on InSb metasurface for both temperature and refractive index sensing”, *Opt. Mater.*, **117**, DOI: 10.1016/j.optmat.2021.111129.

[4] A. Prasad, J. Choi, Z. Jia, et al. (2019) “Nanohole array plasmonic biosensors: Emerging point-of-care applications”, *Biosens. Bioelectron.*, **130**, pp.185-203, DOI: 10.1016/j.bios.2019.01.037.

[5] Y. Yanase, T. Hiragun, T. Yanase, et al. (2013), “Application of SPR imaging sensor for detection of individual living cell reactions and clinical diagnosis of type I allergy”, *Allergol. Int.*, **62(2)**, pp.163-169, DOI: 10.2332/allergolint.12-RA-0505.

[6] E. Mauriz, A. Calle, J.J. Manclús, et al. (2007), “Multi-analyte SPR immunoassays for environmental biosensing of pesticides”, *Anal. Bioanal. Chem.*, **387(4)**, pp.1449-1458, DOI: 10.1007/s00216-006-0800-z.

[7] J.F. Li, C.Y. Li, R.F. Aroca (2017), “Plasmon-enhanced fluorescence spectroscopy”, *Chem. Soc. Rev.*, **46(13)**, pp.3962-3979, DOI: 10.1039/C7CS00169.

[8] S.V. Boriskina, H. Ghasemi, G. Chen (2013), “Plasmonic materials for energy: From physics to applications”, *Mater. Today*, **16(10)**, pp.375-386, DOI: 10.1016/j.mattod.2013.09.003.

[9] W.L. Barnes, A. Dereux, T.W. Ebbesen (2003), “Surface plasmon subwavelength optics”, *Nature*, **424(6950)**, pp.824-830, DOI: 10.1038/nature01937.

[10] T. Maurer, P.M. Adam, G. Lévêque (2015), “Coupling between plasmonic films and nanostructures: From basics to applications”, *Nanophotonics*, **4(3)**, pp.363-382, DOI: 10.1515/nanoph-2014-0015.

[11] K.L. Kelly, E. Coronado, L.L. Zhao, et al. (2003), “The optical properties of metal nanoparticles: The influence of size, shape, and dielectric environment”, *J. Phys. Chem. B*, **107(3)**, pp.668-677, DOI: 10.1021/jp026731y.

[12] M.C. Daniel, D. Astruc (2004), “Gold nanoparticles: Assembly, supramolecular chemistry, quantum-size-related properties, and applications toward biology, catalysis, and nanotechnology”, *Chem. Rev.*, **104(1)**, pp.293-346.

[13] A. Taflove, S.C. Hagness, M.P. May (2005), *Computational Electromagnetics: The Finite-Difference Time-Domain Method (Electrical Engineering Handbook)*, Elsevier, pp.629-670, DOI: 10.1016/B978-012170960-0/50046-3.

[14] T.T. Hoang, T.S. Pham, X.B. Nguyen, et al. (2022), “High contrast and sensitive near-infrared refractive index sensors based on metal-dielectric-metal plasmonic metasurfaces”, *Phys. B Condens. Matter*, **631**, DOI: 10.1016/j.physb.2021.413469.

[15] T.K. Nguyen, T.D. Le, P.T. Dang, et al. (2017), “Asymmetrically engineered metallic nanodisk clusters for plasmonic Fano resonance generation”, *J. Opt. Soc. Am. B*, **34(3)**, DOI: 10.1364/JOSAB.34.000668.